

ESTIMATIVAS DE CARBONO NA COBERTURA VEGETAL DA APA FERNÃO DIAS (MG) POR MEIO DE DADOS ESPECTRAIS E DE CAMPO

Carbon Estimation In The Vegetable Coverage Of APA
Fernão Dias (MG) By Using Spectral Data And Field
Data

Daniel Dias de Andrade¹

¹Mestre em Geografia pela Universidade
Estadual de Campinas, UNICAMP, Brasil.

Resumo

O uso de modelos de estimativa de carbono por meio de dados de sensoriamento remoto contribui para mensurar e estimar o carbono fixado na biomassa vegetal, buscando evitar dessa forma a destruição e a degradação da cobertura vegetal através da possibilidade de sua quantificação e valoração. O objetivo do presente trabalho foi avaliar o potencial de se estimar o estoque de carbono na biomassa viva acima do solo em uma área de Floresta Ombrófila Madura na Área de Proteção Ambiental (APA) Fernão Dias, por meio da relação entre dados amostrados na área de estudo e dos índices de vegetação gerados a partir de respostas espectrais detectadas pelo satélite *Landsat 5*. O grau de relação entre o Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI), o Índice de Vegetação pela Razão (SRI), o Índice de Vegetação Melhorado (EVI), o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI), o Índice de Vegetação Perpendicular (PVI) e os dados amostrados foi obtido por meio de equações de regressão linear simples. Foram obtidas correlações distintas entre as variáveis espectrais (índices de vegetação) e os parâmetros biofísicos (carbono): $r^2 = 0,738; 0,728; 0,721; 0,670; e 0,542$, respectivamente. Os resultados obtidos das respostas espectrais e dos valores amostrados apresentaram correlações positivas. A correlação entre estes diminuiu à medida em que se amplia e se diversifica a área da estimativa.

Palavras-chave: Área de proteção ambiental, Ciências florestais, Índices de vegetação, Sensoriamento remoto.

Abstract

The use of carbon estimation models through remote sensing data contributes to measure and estimate the carbon fixed in biomass, avoiding the destruction and degradation of vegetation cover through the possibility of its rating. The aim of this study was to evaluate the potential of estimating the carbon stock of aboveground living biomass in a Mature Evergreen Forest at the Environmental Protection Area (APA) Fernão Dias, by use of the relationship between sampled data in the study area and vegetation indices generated from spectral responses detected by the *Landsat 5* imagery. The relationship rate between Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI), Simple Ratio Index (SRI), Enhanced Vegetation Index (EVI), Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Perpendicular Vegetation Index (PVI), and field data was obtained by simple linear regression equations. Distinct

Correspondência:

Daniel Dias de Andrade
Email: dand_19@yahoo.com.br

Recebido em outubro de 2014
Aprovado em setembro de 2015
Artigo disponível em
www.cadegeo.uff.br

correlations for the spectral variables (vegetation indices) and the biophysical parameters (Carbon) were obtained: $r^2 = 0.738$; 0.728 ; 0.721 ; 0.670 ; e 0.542 , respectively. The results obtained from the spectral responses and the sample values were positively correlated. The correlation between them has decreased when the area used in the estimation is increased and diversified.

Keywords: Environmental Protection Area, Forest sciences, Remote sensing, Vegetation indices.

INTRODUÇÃO

Os estudos que objetivam a preservação e dinâmica de regeneração de fragmentos florestais têm fornecido subsídios para a elaboração de modelos de recomposição e de implementação de reservas, os quais diminuem custos, aumentam sua eficiência e auxiliam nos estudos de manejo e na tomada de medidas de preservação da vegetação nativa remanescente.

Segundo relatório do Conselho Executivo do Mecanismo de Desenvolvimento limpo (MDL) (UNFCCC, 2013), uma solicitação feita pela Conferência das Partes (COP) em Doha pediu a este conselho a consideração de abordagens metodológicas economicamente mais eficientes na estimativa dos estoques iniciais e de emissões de carbono, incluindo o uso de sensoriamento remoto para monitoramento, ao mesmo tempo em que as estimativas mais conservadoras continuem sendo utilizadas para garantir a integridade ambiental dos projetos de florestamento e reflorestamento.

As medidas espectrais obtidas pelos sensores remotos são afetadas pelos mecanismos de espalhamento atmosférico, juntamente com a radiação refletida por uma superfície não Lambertiana (anisotrópica). Segundo Ponzoni et al., (2007), todo sensor transforma o valor da intensidade do fluxo de radiação eletromagnética (REM) incidente sobre o detector em voltagem, que por sua vez é transformada em potência (radiância), definindo a resolução radiométrica de um sensor.

As imagens obtidas pelos sensores *Thematic Mapper* (TM) dos satélites *Landsat 4* e *5* apresentam resolução radiométrica de 8 bits, discretizados em números digitais (ND), e um campo de visada instantâneo (*Instantaneous Field of View* - IFOV) projetado no terreno de 30 x 30 m para as bandas de 1 a 5 e 7, as quais foram selecionadas para maximizar o uso dos fatores dominantes que controlam a refletância das folhas, tais como pigmentação, estrutura da folha e dossel e conteúdo de umidade (JENSEN, 2009). Trabalhando com imagens cujos NDs foram convertidos para valores de Refletância Bidirecional aparente (FRB aparente) é possível representar um parâmetro físico apresentado em uma mesma escala (PONZONI e SHIMABUKURO, 2009).

Desde que foi lançado o primeiro satélite da série *Landsat (ERTS-1)*, em 1972, começaram a ser desenvolvidos vários índices de vegetação, dos quais a maioria são restritos às refletâncias das faixas do visível e do infravermelho próximo. O Índice de Vegetação pela Razão Simples (*Simple Ratio Index* – SRI) (PEARSON e MILLER, 1972) pode ser um bom indicador do crescimento de uma cultura agrícola e da estimativa de biomassa vegetal. Este índice é especialmente sensível a variações em biomassa ou em Índices de Área Foliar (IAF)¹ para a vegetação de grande biomassa, tal como florestas.

Entre os índices de vegetação mais frequentemente utilizados está o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index* - NDVI), proposto por Rouse et al., (1974) cujo cálculo ocorre em função da relação entre a subtração e a soma entre as refletâncias das faixas do infravermelho próximo e a do vermelho. Por causa desta normalização,

¹ Índice empregado para medir a área total das folhas. O IAF é definido como a soma da área total das folhas em uma área da superfície do solo de 1 metro quadrado. O aumento da refletância chega a um valor constante quando o IAF alcança um valor máximo (LIU, 2006).

os efeitos das variações nas condições de iluminação e nas inclinações do terreno costumam ser minimizados (LILLESAND et al., 2007).

O NDVI é sensível à quantidade, distribuição e condição da vegetação foliar verde (quantidade de clorofila), de IAF e PAR (Radiação Fotossinteticamente Ativa - *Photosynthetic Active Radiation*), e está associado à composição das folhas, sobreposição de camadas de folhas e à arquitetura do dossel, sendo frequentemente utilizado nos estudos ligados ao fenômeno da fotossíntese, estoques de carbono, balanço hídrico e outros processos relacionados (LILLESAND et al., 2007; LIU, 2006). Em áreas onde o dossel apresenta grande recobrimento das copas das árvores, este índice satura quando o recobrimento do sensor do satélite somente registra a refletância superficial, e não mais a refletância das folhas abaixo da copa (LIU, 2006).

Com o objetivo de minimizar a interferência da refletância da superfície do solo abaixo da vegetação, enquanto a superfície do solo é parcialmente coberta com vegetação, Richardson e Wiegand (1977) propuseram um índice baseado na combinação entre as bandas 5 (vermelho) e 7 (infravermelho próximo) do sensor MSS do *Landsat*, conhecido como Índice de Vegetação Perpendicular (PVI), dando origem aos demais índices de vegetação baseados em distância. Ele representa a distância perpendicular entre o ponto da vegetação e a linha da superfície do solo abaixo da vegetação, calculada pela coordenada de pixel, definida pelos eixos das refletâncias do infravermelho e do vermelho em um plano cartesiano (LIU, 2006). O limite inferior no gráfico entre estas duas faixas corresponderia aos valores dos *pixels* que contêm informações de superfícies com solo totalmente exposto, ou seja, nas situações em que o IAF é igual à zero (PONZONI e SHIMABUKURO, 2009).

Huete (1988), considerando diferentes graus de exposição e características da refletância do solo, que variam dependendo da densidade da vegetação que se deseja analisar, introduziu uma constante "L" à equação do NDVI, também com a finalidade de minimizar o efeito do brilho do solo. Um valor de $L = 0,5$ no espaço refletância vermelho x infravermelho próximo minimiza as variações de brilho do solo, eliminando a necessidade de calibrações adicionais para diferentes solos (JENSEN, 2009). Dessa forma, Huete propôs o Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (*Soil Adjusted Vegetation Index* – SAVI). De forma geral, ao se elevar o IAF, o valor de L deve ser diminuído gradativamente, até o momento em que, havendo menor influência do solo (onde o SAVI se equivale ao NDVI), o valor de L seja igual à zero.

O Índice de Vegetação Melhorado (*Enhanced Vegetation Index* – EVI) foi proposto por Justice et al., (1998), com o objetivo de otimizar o sinal da vegetação em regiões com maiores densidades de biomassa através da redução da influência da refletância do solo. Para tanto, aplica-se um fator de ajuste que engloba a transferência radiante diferencial e não linear entre o infravermelho e o vermelho através de um dossel, e a influência da atmosfera sobre a resposta do dossel, para efeito de aerossóis, por meio de coeficientes que usam a faixa do azul para ajustar a influência dos aerossóis na faixa do vermelho.

Com relação à mensuração do teor de carbono existente na biomassa de florestas, o método da *determinação* ou *destrutivo* define o volume/massa de madeira contida num hectare, por meio da derrubada e da pesagem da madeira. O segundo método, denominado *indireto* ou *estimativo*, consiste em estimar a biomassa da floresta com base em equações matemáticas (alométricas) que relacionam o diâmetro do tronco a outras partes das árvores contidas em uma determinada área amostrada. Este método também pode ser empregado por meio de razões ou regressões entre os dados provenientes dos inventários florestais (diâmetro à altura do peito - DAP; altura; volume) e os dados provenientes de sensoriamento remoto, sendo este método mais apropriado para florestas homogêneas, nas quais a variabilidade entre plantas é pequena (LEMOS et al., 2010).

O estabelecimento de correlações significativas entre a quantidade de biomassa amostrada na superfície e a cobertura vegetal obtida das imagens orbitais pode contribuir para a geração de conhecimento para a valoração e a preservação das coberturas vegetais. Nesta perspectiva, este estudo objetivou avaliar o potencial de se estimar o carbono estocado na biomassa viva epígea da APA Fernão Dias, por meio da relação entre dados de biomassa

amostrados *in loco* oriundos de inventário florestal e os índices de vegetação gerados a partir das bandas espectrais do sistema sensor *TM* do satélite *Landsat 5*.

MATERIAIS E MÉTODOS

A Área de Proteção Ambiental (APA) Fernão Dias é uma Unidade de Conservação Estadual de Uso Sustentável localizada na porção mais ao Sul do Estado de Minas Gerais, na divisa com o Estado de São Paulo (Figura 1).



Figura 1. Localização da APA Fernão Dias na América do Sul e na Região Sudeste do Brasil.

Esta UC abrange uma área de cerca de 180 mil hectares e se distribui integralmente pelos municípios de Toledo, Extrema, Itapeva, na porção Oeste, Camanducaia e Sapucaí Mirim, na porção centro-leste (onde ocupa terrenos na Serra da Mantiqueira Meridional e Serra da Bocaina), Gonçalves e parte dos municípios de Paraisópolis e Brazópolis, na porção Nordeste. Dentro dos limites da APA estão localizados os principais tributários dos rios Camanducaia - principal afluente do Rio Jaguari - e Jaguari, que abastecem o reservatório Jaguari, o maior contribuinte do Sistema Cantareira, responsável pela maior parte do abastecimento de água da Região Metropolitana de São Paulo e de Campinas. O território da APA abrange também as bacias hidrográficas dos rios Sapucaí e Sapucaí-Mirim, formadores do reservatório de Furnas.

Os municípios têm como base econômica a atividade agropecuária em pequenas propriedades, a silvicultura e o turismo na região serrana (MORETTI, 2011). As zonas de tensão ecológica entre as formações de Floresta Estacional Semidecidual, Ombrófila Densa e Ombrófila Mista estão relacionadas muitas vezes ao relevo e a gradientes topográficos. Estas ocorrem em regiões de montanhas, compondo o relevo típico da Serra da Mantiqueira. O clima da região, de acordo com o sistema de Köppen, é o subtropical de altitude (Cwb), temperado chuvoso com verão fresco. Nas superfícies acima de 1.600 m, é registrada uma média de temperatura inferior a 17°C nos meses mais quentes, e uma média anual inferior à 14°C, uma das mais baixas do Brasil (IBITU, 1998).

Foi utilizado como área teste para desenvolvimento deste estudo o fragmento florestal 97, localizado na fazenda Levantina, distrito de Monte Verde, município de Camanducaia (MG). Este fragmento é um dos oito fragmentos fisionômicos de "Floresta Ombrófila" que recobre a região mais ao Sul do Estado, amostrados em uma primeira etapa no Mapeamento e inventário da flora nativa e dos reflorestamentos de Minas Gerais (SCOLFORO e CARVALHO, 2006). O fragmento é constituído de 20 parcelas amostrais de 1.000 m² de área cada (10 x 100 m), localizados na divisa dos estados de Minas Gerais e São Paulo, entre os municípios de Camanducaia, pertencente à APA Fernão Dias, e Joanópolis, no Estado de São Paulo, pertencente à APA Sistema Cantareira.

Cada parcela conta com 10 subparcelas de 10 x 10 m. Na primeira subparcela de cada parcela, foram medidas todas as plantas com CAP² maior ou igual a 9,4 cm ou DAP³ maior ou igual a 3 cm. De acordo com o inventário, foram estimados os seguintes dados para o fragmento 97: Peso médio de matéria seca: 184,5 t/ha; Estoque de carbono: 81,9 t/ha (SCOLFORO e CARVALHO, 2006). Os dados originais para as parcelas amostradas, utilizados no inventário, são apresentados na Tabela 1, demonstrando a data da primeira medição realizada, as coordenadas Este (E) e coordenadas Norte (N) pertencentes à Zona 23 Sul do Sistema Universal Transversa de Mercator (UTM), obtidas de 2 vértices de cada parcela, a identificação por número das parcelas e as quantidade de matéria seca e de carbono estimadas a partir das medidas realizadas nas subparcelas.

Tabela 1. Dados originais para o fragmento 97 utilizados no Mapeamento e inventário da flora nativa e dos reflorestamentos de Minas Gerais (SCOLFORO e CARVALHO, 2006).

Medição número	Data da medição	Parcela número	Coordenadas 1	Coordenadas 2	Área da parcela (m ²)	Peso de Matéria Seca (t/ha)	Quantidade de Carbono (t/ha)
1	22/06/2006	1	391642;7469095	391684;7469009	1.000	16,00	7,40
1	23/06/2006	2	391740;7468809	391773;7468735	1.000	16,05	7,46
1	06/07/2006	3	391829;7468541	3191859;7468449	1.000	25,40	11,76
1	06/07/2006	4	391915;7468252	391951;7468160	1.000	18,23	8,49
1	23/06/2006	5	391351;7468953	391385;7468857	1.000	21,25	10,06
1	28/06/2006	7	391554;7468387	391587;7468292	1.000	34,54	16,33
1	03/07/2006	8	391655;7468103	391691;7468011	1.000	21,00	9,86
1	30/06/2006	9	391734;7467889	391768;7467796	1.000	15,11	7,08
1	30/06/2006	10	391750;7467743	391840;747749	1.000	9,46	4,43
1	28/06/2006	11	391073;7468816	391107;748723	1.000	20,05	9,36
1	03/07/2006	12	391174;7468537	391208;7468440	1.000	18,83	8,87
1	04/07/2006	13	391275;7468252	391309;7468157	1.000	11,89	5,67
1	07/07/2006	14	391377;7467970	391410;7467874	1.000	31,98	15,00
1	05/07/2006	15	391478;7467688	391511;7467593	1.000	6,90	3,20
1	11/07/2006	16	390813;7468689	390838;7468591	1.000	26,19	12,29
1	11/07/2006	17	390914;7468400	390945;748308	1.000	8,79	4,10
1	12/07/2006	18	391012;748118	391049;7468002	1.000	4,56	2,12
1	13/07/2006	19	391113;7467835	391144;7467743	1.000	21,46	10,10
1	17/07/2006	20	391211;7467554	391245;7467458	1.000	7,34	3,43
1	03/08/2006	6	391452;7468668	391486;7468573	1.000	34,10	15,96

Considerando a área das parcelas inseridas no fragmento, a estimativa para o estoque de carbono é de 86,48 t/ha⁴.

Algumas avaliações foram realizadas com o objetivo de se obter uma correlação adequada entre os valores de carbono medido *in loco* e os valores dos índices de vegetação

² Circunferência à Altura do Peito (1,30 m).

³ Diâmetro à Altura do Peito (1,30 m).

⁴ Considerando que a quantidade de carbono mostrada na Tabela 1 refere-se à estimativa a partir do peso médio total (t) de matéria seca presente em cada parcela, dividiu-se a soma entre o carbono das parcelas por 2. Sendo a área total das parcelas do fragmento igual à 2 hectares, estimou-se o valor do estoque de carbono para as parcelas do fragmento 97 em t/ha.

obtidos nas cenas do satélite *Landsat 5*, órbita/ponto 219/076, de 14/09/2006 (avaliação 1) e de 12/07/2006 (avaliação 2 a 4c), corrigidas em sua radiometria e na interferência atmosférica pelo método de subtração dos pixels escuros (*Dark Object Subtraction – DOS*) (CHAVEZ, 1989). As datas de obtenção das imagens pelo satélite seguiram períodos similares à realização das amostragens de campo.

Em 13, 14 e 15/06/2012 foi realizada uma visita à área amostrada com o objetivo de aumentar a precisão das coordenadas originais dos vértices das parcelas, mostradas na Tabela 1. O apoio da equipe da Fundação de Desenvolvimento Científico e Cultural (FUNDECC), contratada pela Universidade Federal de Lavras (UFLA), permitiu a continuidade do monitoramento dos dados do inventário e a realização de coletas com o Sistema de Posicionamento Global por Satélite (GPS) *Garmin 60CS* e *60CSx*. Considerou-se as coordenadas Leste (E) e Norte (N) pertencentes à Zona 23 Sul do Sistema UTM, dos 4 vértices (V) de 17 parcelas (P), mostradas na Tabela 2, juntamente com a altitude do ponto.

Tabela 2. Coordenadas UTM e altitudes dos vértices das parcelas percorridas no local da amostragem.

TRANSECTO (T), PARCELA (P) e VÉRTICE (V)	E (m)	N (m)	Altitude (m)	TRANSECTO (T), PARCELA (P) e VÉRTICE	E (m)	N (m)	Altitude (m)
T1P01V1	391644	7469081	1598	T2P10V3	391825	7467794	1816
T1P01V2	391683	7469002	1561	T2P10V4	391732	7467770	1812
T1P01V3	391684	7469008	1559	T3P11V1	391101	7468846	1637
T1P01V4	391654	7469085	1596	T3P11V2	391118	7468756	1674
T1P02V1	391753	7468821	1514	T3P11V3	391129	7468757	1676
T1P02v2	391787	7468726	1604	T3P11V4	391096	7468842	1639
T1P02V3	391785	7468735	1605	T3P12V1	391176	7468566	1708
T1P02V4	391759	7468821	1538	T3P12V2	391209	7468473	1695
T1P04v1	391928	7468271	1690	T3P12V3	391219	7468482	1691
T1P04v2	391959	7468161	1710	T3P12V4	391184	7468569	1704
T1P04v3	391964	7468172	1714	T3P13V1	391255	7468275	1727
T1P04v4	391922	7468263	1690	T3P13V2	391291	7468184	1697
T2P05V1	391382	7468986	1648	T3P13V3	391298	7468191	1691
T2P05V2	391410	7468892	1633	T3P13V4	391274	7468280	1736
T2P05V3	391422	7468905	1638	T3P14V1	391129	7468001	1691
T2P05V4	391390	7468989	1648	T3P14V2	391130	7467910	1710
T2P06V1	391483	7468703	1642	T3P14V3	391131	7467913	1709
T2P06V2	391499	7468613	1598	T3P14V4	391132	7468008	1679
T2P06V3	391516	7468618	1618	T3P15V1	391133	7467728	1793
T2P06V4	391478	7468708	1614	T3P15V2	391134	7467639	1787
T2P07V1	391575	7468422	1631	T3P15V3	391135	7467639	1783
T2P07V2	391600	7468332	1652	T3P15V4	391136	7467728	1797
T2P07V3	391608	7468339	1646	T4P16V1	390813	7468711	1666
T2P07V4	391578	7468412	1617	T4P16V2	390838	7468619	1680
T2P08V1	391693	7468136	1682	T4P16V3	390848	7468623	1665
T2P08V2	391734	7468053	1721	T4P16V4	390821	7468718	1657
T2P08V3	391743	7468040	1684	T4P17V1	390895	7468435	1712
T2P08V4	391700	7468140	1681	T4P17V2	390926	7468346	1763
T2P09V1	391761	7467933	1732	T4P17V3	390932	7468348	1766
T2P09V2	391793	7467846	1758	T4P17V4	390906	7468439	1719
T2P09V3	391801	7467853	1759	T4P19V1	391093	7467917	1712
T2P09V4	391769	7467931	1735	T4P19V2	391122	7467818	1679
T2P10V1	391739	7467751	1800	T4P19V3	391127	7467832	1681
T2P10V2	391828	7467783	1821	T4P19V4	391100	7467923	1701

Este procedimento possibilitou a chegada às parcelas através da direção e orientação das linhas amostrais/transectos (T) e a obtenção de cerca de 2/3 das coordenadas com um GPS mais

preciso, que apresenta erros menores em comparação com os erros do GPS de versão anterior (6oCS), que também fora utilizado.

Para cada uma das parcelas avaliadas foi calculada a média ponderada do valor do índice de vegetação (MP IV) de cada *pixel* nela inserido, a qual foi utilizada para o cálculo do coeficiente de determinação (r^2) em relação ao carbono medido em campo, através de regressão linear simples. As avaliações 1, 2 e 3 apresentaram baixa correlação e grande probabilidade de erro e/ou nenhuma significância. Considerando que as coordenadas das 20 parcelas originais utilizadas não tiveram sua posição geográfica confirmada *in loco*, optou-se por eliminá-las da análise. Dessa forma, utilizou-se para a avaliação 4 as 17 parcelas das quais foram obtidas as coordenadas dos 4 vértices limítrofes, durante a visita à área de amostragem.

Adicionalmente, a partir da avaliação 4, utilizou-se a cena TM-5 de 12/07/2006 disponibilizada pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (*United States Geological Survey - USGS*) que, de acordo com as informações do produto⁵, possui um nível de correção ("*Data Type Level 1 - L1T*") que incorpora pontos de controle (GLS2005), enquanto emprega um Modelo Digital de Elevação (DEM) (SRTM, NED, CDED, DTED e GTOPO30). Esta medida dispensou a realização de nova correção geométrica das cenas, que fora realizada nas avaliações anteriores.

Obteve-se um melhor ajuste entre as variáveis espectrais e amostradas para a avaliação 4c, na qual foram retiradas 4 das 17 parcelas visitadas, que poderiam conter inconsistências nos dados primários de carbono e/ou em sua posição geográfica. Os valores de Carbono (t/ha) e das médias ponderadas dos valores dos índices EVI, SAVI, NDVI, SRI e PVI para cada uma das 17 parcelas utilizadas na avaliação 4 e para as 13 parcelas utilizadas na estimativa final (avaliação 4c), são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3. Valores da média ponderada por parcela para o Índice de vegetação Melhorado (EVI), Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI), Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) e Índice de Vegetação pela Razão Simples (SRI), calculados para a avaliação 4, e para o Índice de Vegetação Perpendicular (PVI), calculado para a avaliação 4c.

Parcelas do Fragmento 97	Quantidade de Carbono (t/ha)	Média Ponderada EVI	Média Ponderada SAVI	Média Ponderada NDVI	Média Ponderada SRI	Média Ponderada PVI
1	74,04	0,23	0,32	0,47	2,80	34,54
2	74,55	0,22	0,30	0,47	2,76	36,98
4	84,93	0,25	0,36	0,51	3,13	41,22
5	100,63	0,23	0,32	0,49	2,96	36,84
6	159,60	0,25	0,37	0,52	3,17	42,46
7	163,34	0,26	0,38	0,55	3,44	37,60
8	98,63	0,20	0,24	0,39	2,32	
9	70,75	0,26	0,37	0,52	3,16	
10	44,34	0,20	0,23	0,32	2,00	31,48
11	93,55	0,23	0,31	0,47	2,79	33,46
12	88,70	0,24	0,32	0,47	2,80	41,40
13	56,74	0,29	0,45	0,58	3,79	
14	149,98	0,26	0,37	0,52	3,15	46,95
15	32,02	0,20	0,24	0,39	2,38	27,08
16	122,89	0,26	0,37	0,52	3,19	45,77
17	40,96	0,23	0,32	0,50	3,03	
19	101,02	0,21	0,28	0,46	2,70	38,05

⁵ Landsat Product Information <http://landsat.usgs.gov/Landsat_Processing_Details.php>. Acesso em 13/09/2015.

Com o melhor coeficiente de determinação apresentado pelo Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI) para $L = 0,5$, calculou-se o carbono estocado para cada *pixel* da área recortada pelos limites da APA Fernão Dias (MORETTI, 2011), segundo o modelo linear apresentado na Equação:

$$\hat{Y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 * I$$

Onde:

\hat{Y} = Carbono estocado na biomassa epígea presente na APA

$\hat{\beta}_0$ = Intercepto

$\hat{\beta}_1$ = Coeficiente angular

I = Média entre os valores do índice de vegetação (M IV) por parcela

As imagens foram subdivididas em cinco classes de intervalos dos valores de densidade de carbono, excluindo-se posteriormente valores negativos e valores maiores de 400 t/ha, inexistentes nos valores de *pixel* calculados.

RESULTADOS

Dentro dos limites da APA Fernão Dias, as classes temáticas para os valores de carbono da biomassa epígea estimados para o índice SAVI ($r^2 = 0,738$, valor $p = 0,0001$), apresentaram valores de 2,70 a 393,97 e uma média de 69,76 t/ha. As cinco classes de valores para o SRI ($r^2 = 0,728$, valor $p = 0,0002$) apresentaram valores de 7,16 a 345,43 e uma média de 42,62 t/ha. Já para o NDVI ($r^2 = 0,670$, valor $p = 0,0006$), foram encontrados valores de 3,96 a 382,76 com uma média de 67,78 t/ha. Para os valores de EVI ($r^2 = 0,721$, valor $p = 0,0002$), foram obtidos valores de 28,8 a 351,22, com uma média de 56,94 t/ha (ANDRADE et al., 2013), enquanto que para o PVI, ($r^2 = 0,542$, valor $p = 0,004$) os valores variaram de 1,58 a 398,41 e apresentaram uma média de 68,73 t/ha.

De acordo com o monitoramento contínuo para o ano de 2007 (IEF-MG, 2015), para os dados do Mapeamento e inventário da flora nativa e dos reflorestamentos de Minas Gerais (SCOLFORO e CARVALHO, 2006), o estoque de carbono (t/ha) estimado a partir do NDVI, derivado de uma imagem TM 5 de 1/09/2007 para a classe temática fisionomia "Floresta Ombrófila", apresentou uma média de 53,64 t/ha⁶. Para fins comparativos, a estimativa de carbono (t/ha) feita a partir do NDVI calculado para a imagem de TM 5 12/07/2006, utilizada a partir da avaliação 4 deste trabalho, para o limite das classes temáticas "Floresta Ombrófila Montana e Alto-Montana" (IEF-MG, 2012), a média obtida foi de 75,85 t/ha, em um intervalo de valores entre 1,56 e 379,36, com desvio-padrão de 44,18 t/ha.

De acordo com a classificação do uso e cobertura das terras realizada por Moretti (2011)⁷ para os limites da classe "Floresta Ombrófila Densa", o valor médio da estimativa de carbono a partir do SAVI foi de 81,70 t/ha, obtida pelo intervalo de valores de 3,90 a 365,52 t/ha, com desvio-padrão de 51,68 t/ha.

A área de drenagem das duas bacias hidrográficas de 4ª e 5ª ordem (STRAHLER, 1952) das Bacias Hidrográficas do Córrego do Abel e do Ribeirão dos Poncianos, que constituem a rede de drenagem da porção sul do município de Camanducaia, apresentam divisores que coincidem com os topos da Serra da Mantiqueira e estão próximos ao limite oeste do fragmento 97. Para estas

⁶ A Classificação produzida para o Mapeamento e inventário da flora nativa e dos reflorestamentos de Minas Gerais (2006) foi feita a partir de correções temáticas no mapa produzido em 2003 e em 2005, a partir de imagens TM Landsat 5 com exatidão global de 87,29%. Fonte: <<http://www.inventarioflorestal.mg.gov.br>>. Acesso em 21/04/2013.

⁷ Para a avaliação do desempenho da classificação pelo método da *máxima verossimilhança* da imagem Landsat 5 de 18/04/2010, os dados da matriz de erro elaborada a partir de amostragem aleatória estratificada de acordo com a porcentagem de cada classe temática possibilitaram o cálculo do índice de exatidão global, que foi de 90,63%, e do índice Kappa (K), que foi de 86,91%

áreas, o estoque de carbono (t/ha) para a biomassa epígea estimado pelo SAVI apresentou o valor médio de $84,09 \pm 56,08$, em um intervalo de valores entre 3,60 e 366,38 t/ha.

O limite do Setor Censitário Rural código 311050910000006, que denomina a situação de aglomerado rural isolado (IBGE, 2010), circunda os seis Setores Censitários Urbanos correspondentes à Vila de Monte Verde. Tal limite representa, em comparação aos outros limites supracitados, a região cujo ponto central está mais próximo do Fragmento 97, amostrado pelo Mapeamento e inventário da flora nativa e dos reflorestamentos de Minas Gerais. A partir do SAVI, estimou-se que a média do valor de carbono estocado foi de $86,78 \pm 57,56$ t/ha, em uma faixa de valores de 1,56 a 351,07. Este valor médio aproximou-se do estimado pelo inventário para o Fragmento 97, de 81,9 t/ha, e foi equivalente ao estimado para as parcelas amostradas, de 86,48 t/ha. A Figura 2 representa os valores para o carbono (t/ha) encontrados dentre os limites do Setor Censitário.

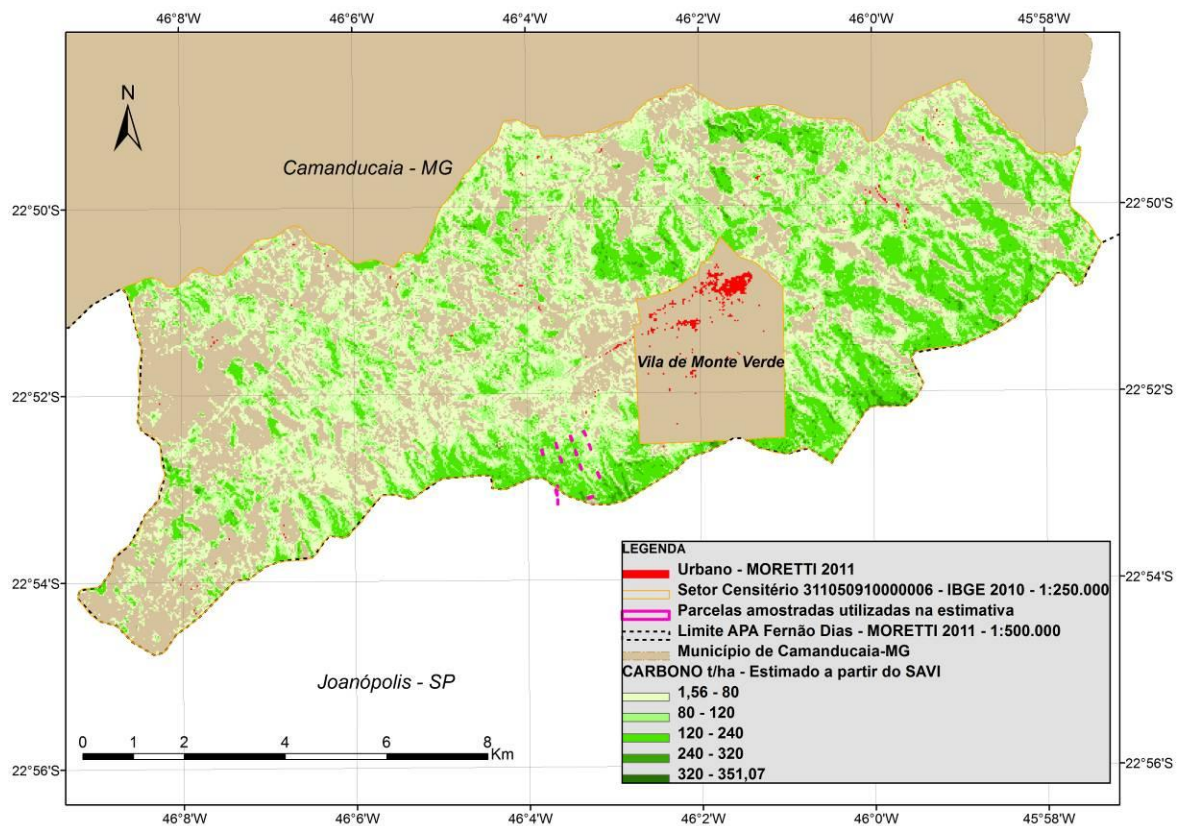


Figura 2. Estoque de carbono estimado a partir do SAVI para o Setor Censitário 311050910000006 (IBGE, 2010).

DISCUSSÃO

O SAVI, o SRI e o EVI apresentaram o melhor valor do coeficiente de determinação entre as amostras. O ajuste inferior apresentado pelo NDVI em relação ao SRI provavelmente se atribuiu à maior sensibilidade deste último às variações da biomassa e do IAF em áreas de floresta. Outro fator que pode ter contribuído para este resultado foi o ajuste para a influência dos solos nas equações do SAVI e do EVI, através da introdução da constante de ajuste à influência do brilho do solo.

Além disto, o EVI, por ser mais sensível às pequenas variações de biomassa em áreas de floresta e à interferência atmosférica, apresentou maior correlação com os parâmetros biofísicos da vegetação local, também comparativamente ao NDVI.

O menor r^2 apresentado pelo NDVI, com exceção do PVI, provavelmente ocorreu em função das características relacionadas aos demais índices, quando comparado com uma possível ocorrência de pontos de saturação em qualquer uma das bandas espectrais utilizadas, ou à presença demasiada de sombras no interior do dossel.

Adicionalmente, o menor ajuste do NDVI em comparação aos demais métodos também pode ser atribuído à homogeneidade da área com relação à densidade de biomassa e recobrimento do dossel em relação ao solo, considerando o fato de que a área de estudo se trata de uma floresta em estágio avançado de regeneração.

Os valores dos coeficientes de determinação estão dentro da faixa observada em estudos similares para outras coberturas florestais tropicais, baseados na correlação entre as variáveis espectrais do *TM Landsat* e a biomassa amostrada *in loco*, e são superiores aos obtidos por Paula e Waterloo Filho (2009), Ponzoni e Rezende (2004), Accioly et al. (2002) e Lu et al. (2005, 2012).

Considerando as regiões próximas e de características fisionômicas similares, a estimativa se aproximou dos valores amostrados para o carbono, apresentando menor equivalência na medida em que se estende e se diversifica a área utilizada na análise. Os índices empregados pela razão de bandas e ajustados, especialmente os derivados do SAVI, apresentaram correlações adequadas com o tipo de cobertura vegetal. A elevada amplitude da faixa de valores de carbono dentro dos limites da APA Fernão Dias provavelmente foi decorrente da diversidade de estágios de regeneração da vegetação e de tipos de uso da terra, em relação à tipologia florestal da área das parcelas amostradas.

Os resultados obtidos podem ser utilizados no diagnóstico ambiental da APA, nos processos de avaliação para redução de emissões de GEE por queima de biomassa, na criação de reservas e em programas de pagamentos por serviços ambientais.

A ortorretificação e a utilização de um modelo de transferência atmosférica devem ser consideradas para o pré-processamento das imagens em futuras etapas de avaliação do índice mais adequado a ser utilizado nas estimativas da cobertura vegetal para a área estudada.

Espera-se que a melhoria no desenvolvimento de metodologias de valoração dos recursos florestais permita que as ações compensatórias, quando houverem, sejam de fato equivalentes ao valor do recurso natural usado pela indústria mundial, considerando sua capacidade de renovação, impacto ambiental e escassez futura.

O valor do recurso extraído, de sua recomposição no ambiente e dos mecanismos que sincronizem a produção para o seu uso sustentável, poderão ser incorporados nos custos da cadeia de produção. Com isto, o caráter compensatório das ações de mitigação poderá ser eliminado. Legislações ambientais internas mais rígidas, a busca pela substituição de matéria-prima, o desenvolvimento de tecnologia que dependa cada vez menos da extração dos recursos naturais e o aumento dos investimentos em energias renováveis devem ser práticas concomitantes a esse processo.

Paralelamente, deve-se investir em pesquisa para que possam ser adotadas as resoluções propostas pelos acordos internacionais. Pois, com relação a estes, ainda pairam incertezas com relação à efetividade de determinadas ações nos projetos de mitigação do aquecimento global.

CONCLUSÃO

Os índices de vegetação gerados a partir de dados de sensoriamento remoto apresentaram correlações positivas com as medições de biomassa *in loco*. Desta maneira, a metodologia aplicada apresentou potencial satisfatório para a estimativa da biomassa epígea da área de Floresta Ombrófila Madura da APA Fernão Dias (MG).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACCIOLY, L. J. de O.; PACHÊCO, A.; COSTA, T. C.; LOPES, O. F.; OLIVEIRA, M. A. J. de. Relações empíricas entre a estrutura da vegetação e dados do sensor TM/LANDSAT. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 6, p. 492-498, 2002.

ANDRADE, D. D.; FERREIRA, M. C.; BOLFE, E. L. Estimativa e mapeamento de carbono em fragmentos florestais da APA Fernão Dias (MG) com uso de dados orbitais do sensor TM-Landsat. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 2013, Vitória - ES. Uso e ocupação da terra e as mudanças das paisagens. Vitória - ES: UFES, 2013. v. 15. p. 1-10.

CHAVEZ, P. S. Radiometric calibration of Landsat thematic mapper multispectral images. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 55, p. 1285-1294, 1989.

HUETE, A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, v. 25, p. 295-309, 1988.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Malha de setor censitário 2010. IBGE, 2010. Disponível em <ftp://geoftp.ibge.gov.br/malhas_digitais/censo_2010/setores_censitarios>. Acesso em 9/07/2011.

IBITU CONSULTORIA AMBIENTAL. APA Fernão Dias – Plano de gestão ambiental. Minas Gerais: IBITU/DER-MG, 1998, 224p.

IEF-MG. Instituto Estadual de Florestas. Inventário florestal de Minas Gerais. Mapeamento da cobertura vegetal 2007. Disponível em <<http://geosisemanet.meioambiente.mg.gov.br/inventarioFlorestal/>>. Acesso em 13/09/2015.

JENSEN, J. R. Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres. São José dos Campos: Parênteses, 2009. 598 p.

JUSTICE, C. O.; VERMOTE, E.; TOWNSHEND, J. R. G.; DEFRIES, R.; ROY, P. D.; HALL, D. K.; SALOMONSON, V.; PRIVETTE, J. L.; RIGGS, G.; STRAHLER, A.; LUCHT, W.; MYNENI, R. B.; KNYAZIKHIN, Y.; RUNNING, S. W.; NEMANI, R. R.; WAN, Z.; HUETE, A. R.; LEEUWEN, W. V.; WOLFE, R. E.; GIGLIO, L.; MULLER, J. P.; LEWIS, P.; BARNESLEY, M. The Moderate Resolution Spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global change research. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, v. 36, n. 4, p.1228-1249, 1998.

LEMOS, A. L. F.; VITAL, M. H. F.; PINTO, M. A. C. As florestas e o painel de mudanças climáticas da ONU. *Florestas. BNDES Setorial*. V. 32. Setembro de 2010. p. 153-192. Disponível em <http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/bndes/bndes_pt/Institucional/Publicacoes/Consulta_Expressa/Setor/Meio_Ambiente/201009_5.html> Acesso em 11/06/2011.

LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W.; CHIPMAN, J. W. Digital image processing. In: *Remote sensing and image interpretation*. New York: John Wiley. 6th ed. p. 491-503, 2007.

LIU, W.T.H. Aplicações de sensoriamento remoto. Campo Grande: Ed.UNIDERP, 2006.908 p.

LU, D.; CHEN, Q.; WANG, G.; MORAN, E.; BATISTELLA, M.; ZHANG, M.; LAURIN, G. V.; SAAH, D. Aboveground forest biomass estimation with Landsat and LiDAR data and uncertainty analysis of the estimates. *International Journal of Forestry Research*, v. 2012, Article ID 436537, 16 pages, 2012. doi:10.1155/2012/436537.

LU, D.; BATISTELLA, M., MORAN, E. Satellite estimation of aboveground biomass and impacts of forest stand structure. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 71, p. 967-974, 2005.

MORETTI, A. I. P. Delimitação de corredores ecológicos na APA Fernão Dias – MG a partir de técnicas de geoprocessamento e análise espacial. 2011. 122 f. Dissertação (Mestre em Geografia) - Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo.

PAULA, M. D.; WATERLOO FILHO, P. Estimativa de carbono em um fragmento de floresta madura na Mata Atlântica nordestina com o uso de índices espectrais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO (SBSR), Natal-RN: INPE, 2009, v.14, p. 2881-2888.

PEARSON, R. L.; L. D. MILLER. Remote mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of the shortgrass prairie. Pawnee National Grasslands, Colorado. In: PROCEEDINGS OF THE EIGHTH INTERNACIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT. Ann Arbor, Michigan, USA, 1972, p. 1357-1381.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. Sensoriamento remoto aplicado ao estudo da vegetação. São José dos Campos: Parêntese, 2009. 127 p.

PONZONI, F. J.; ZULLO JUNIOR, J.; LAMPARELLI, R. A. C. Calibração absoluta de sensores orbitais: conceituação, principais procedimentos e aplicação. São José dos Campos: Parêntese, 2007. 65 p.

PONZONI, F. J.; REZENDE, A. C. P. Caracterização espectral de estágios sucessionais de vegetação secundária arbórea em Altamira (PA), através de dados orbitais. Revista Árvore, v. 28, p. 535-545, 2004.

RICHARDSON, A. J.; WIEGAND, C. L. Distinguishing vegetation from soil background information. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, v. 1, n. 43, p. 1541-1552, 1977.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W.; HARLAN, J. C. Monitoring the vernal advancement of retrogradation (greenwave effect) of natural vegetation. Greenbelt: NASA, 1974. 371 p. (NASA/GSFC. Final report).

SCOLFORO, J. R.; CARVALHO, L. M. T. Mapeamento e inventário da flora nativa e dos reflorestamentos de Minas Gerais. Lavras: UFLA, 2006. 288 p. Disponível em <<http://www.inventarioflorestal.mg.gov.br>> Acesso em 27/06/ 2011.

STRAHLER, A. N. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topology. Geological Society of America Bulletin, v. 63, n. 10, p. 1117-1142, 1952.

UNFCCC. Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças do Clima. Conselho Executivo do MDL. Guidance relating to the clean development mechanism. Report of the Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to the Kyoto Protocol on its eighth session, held in Doha from 26 November to 8 December 2012. Disponível em <http://unfccc.int/meetings/doha_nov_2012/meeting/6815/php/view/decisions.php>. Fevereiro de 2013. Acesso em 11/04/2013.